

Optimisation de la fumure soufrée par estimation du risque de carence

I. Colza d'automne

D. PELLET¹, Edith MERCIER et Ursula BALESTRA, Station fédérale de recherches en production végétale de Changins, CH-1260 Nyon 1

J.-C. LAVANCHY et H.-R. PFEIFER, Centre d'analyse minérale de l'Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne-Dorigny BFSH-2

A. KEISER et N. BEZENÇON, Haute école suisse d'agronomie, CH-3052 Zollikofen

@ E-mail: didier.pellet@rac.admin.ch
Tél. (+41) 22 36 34 444.

Résumé

Les résultats d'essais de fertilisation soufrée conduits pendant quatre saisons de cultures ont permis d'améliorer un système de prévision du risque de carence en soufre présenté en 2001 dans les *Données de Base pour la Fumure des grandes Cultures et des Herbages* (RYSER *et al.*, 2001). Ce modèle à points, basé sur des critères agronomiques et pédo-climatiques, a permis d'expliquer 85% de la variabilité du rendement du colza d'automne en réponse à la fumure soufrée. Dans l'ordre d'importance, les facteurs explicatifs étaient la profondeur du sol, le pourcentage d'argile, la matière organique et l'azote disponible. De plus, les précipitations d'octobre à mars, la pierrosité du sol et la fréquence d'application d'engrais organique ont également été prises en compte dans l'attribution des points. Le risque de carence a été divisé en trois catégories. Le seuil du risque de carence faible a été fixé à 24 points et aucune fertilisation soufrée n'est préconisée pour ce niveau de risque. La fumure optimale pour un risque modéré de 15 à 23 points a été établie à 35 kg S/ha. Le risque élevé de carence (inférieur à 15 points) n'était pas présent dans les essais mais une recommandation de 60 kg S/ha a été fixée pour ce niveau. La fumure soufrée a entraîné un accroissement significatif du prélèvement de S par la plante. Après l'application de fumure soufrée, la teneur en glucosinolates des grains de colza était significativement plus élevée dans tous les cas de risque de carence modéré et dans trois cas sur six dans les situations de risque de carence faible. Concernant la teneur en huile, le soufre a eu une influence positive dans quatre cas de risque de carence modéré sur neuf et aucun effet sur les cas de risque faible. Cette méthode de prévision du risque doit permettre aux agriculteurs d'optimiser la fumure soufrée du colza d'automne sans en pénaliser la qualité.

Introduction

En l'absence de fertilisation soufrée, on note depuis quelques années davantage de cas de cultures présentant des symptômes de carence en cet élément, en particulier chez les plantes sensibles comme le colza. La gestion du soufre a longtemps été négligée puisque les pratiques courantes de fertilisation (application régulière d'engrais de ferme et d'engrais minéraux contenant du soufre) de même que les immissions atmosphériques dues à l'industrialisation appar-

taient suffisamment de soufre pour satisfaire les besoins des cultures (SCHEERER, 2001; ERIKSEN *et al.*, 1998).

Cependant, depuis le début des années quatre-vingt, les émissions atmosphériques de soufre ont été considérablement réduites, consécutivement à l'application des réglementations environnementales de plusieurs pays industrialisés. En Suisse, l'émission annuelle de dioxyde de soufre a baissé de plus de 75% depuis 1980 (ANONYME, 2002a). De plus, les pratiques agricoles ont changé, notamment l'utilisation de variétés plus exigeantes en soufre (variétés 00), bien que produisant des grains

pauvres en composés soufrés, ainsi que l'emploi d'engrais azotés et phosphorés plus concentrés et pauvres en soufre (GUPTA *et al.*, 1997; ZHAO *et al.*, 1999). La demande en soufre a augmenté alors que les apports indirects ont diminué provoquant l'apparition de carences et des pertes de rendement qui en découlent.

L'approvisionnement en soufre a donc des conséquences économiques mais également environnementales. Cet élément joue un rôle dans la résistance des cultures contre certaines maladies ou insectes. Ainsi, une bonne gestion du soufre peut contribuer à limiter les inter-

¹Avec l'assistance technique de Y. Grosjean.

ventions phytosanitaires (CECOTTI *et al.*, 1998). De plus, la déficience en soufre est un facteur limitant l'efficacité de l'azote, ce qui peut contribuer à la contamination des eaux souterraines par les nitrates (CECOTTI *et al.*, 1998). A l'inverse, cependant, la surfumure soufrée peut hypothéquer la qualité des récoltes: la teneur en glucosinolates du colza augmente avec la fumure soufrée (ZHAO *et al.*, 1993b; SCHNUG, 1989). Afin de limiter les coûts de production tout en respectant les principes d'une agriculture durable, il convient donc d'éviter les applications systématiques qui peuvent s'avérer inutiles. C'est dans cette optique qu'un modèle de prévision du risque de carence en soufre, établi à partir d'un modèle de BASF (ANONYME, 1997a), a été présenté en mai 2001 dans les *Données de Base pour la Fumure des grandes Cultures et des Herbages* (DBF 2001). Après analyse des résultats de quatre saisons d'essais, le modèle a été adapté au colza d'automne et permet de classer les parcelles selon leur risque potentiel de carence en soufre, avec une recommandation de fumure soufrée adaptée à nos conditions. Des résultats concernant l'influence de la fertilisation soufrée sur le prélèvement en soufre et sur les critères de qualité du colza sont également présentés. Un deuxième article (PELLET *et al.*, 2003) porte sur le modèle de prévision adapté à la culture du blé d'automne.

Matériel et méthodes

Descriptif du modèle à points

Le modèle à points s'inspire de celui développé par BASF (ANONYME, 1997a). Le choix des différents critères est expliqué ci-dessous et la répartition des points est présentée dans le tableau 1.

- ① **Pourcentage d'argile:** l'adsorption des sulfates dépend en partie de la charge et de la surface de fixation disponible sur les colloïdes d'argile (BONH *et al.*, 1986). Ainsi, les sols lourds sont peu sensibles au lessivage puisqu'ils ont une capacité de rétention de l'eau et des sulfates plus élevée que les sols légers (BLOEM, 1998).
- ② **Pourcentage de matière organique:** selon BLOEM (1998), jusqu'à 95% du soufre est présent dans les sols sous forme organique. Ainsi, les sulfates produits par la minéralisation de la matière organique du sol sont une source de soufre pour les plantes (ERIKSEN *et al.*, 1998).
- ③ **Profondeur d'enracinement:** elle se définit comme la profondeur potentiellement disponible pour l'enracinement. Elle influence le volume de sol pouvant

Tableau 1. Critères permettant d'évaluer le risque de carence en soufre d'une parcelle.

Critères	Critère d'appréciation	Points
% d'argile du sol	< 10	1
	10 à 30	3
	> 30	5
% matière organique	< 2	1
	2 à 5	3
	> 5	5
Profondeur d'enracinement	< 30 cm	1
	30 à 70 cm	5
	> 70 cm	7
Pierrosité (% du volume)	> 30	1
	10 à 30	3
	< 10	5
Précipitations 1 ^{er} octobre-31 mars	> 540 mm	1
	de 370 à 540 mm	3
	< 370 mm	5
Engrais de ferme sur la parcelle	Aucun	1
	Occasionnellement (> 3 ans)	3
	Régulièrement (± 3 ans)	5
Différence de fumure azotée appliquée par rapport à la dose prévue ¹	Supplément > 40 kg/ha	1
	Dose prévue ± 40 kg/ha	3
	Réduction > 40 kg N/ha	5

¹Dose d'azote N calculée d'après la méthode des normes corrigées ou la méthode N_{min} (RYSER *et al.*, 2001).

- être exploré par les racines pour l'approvisionnement en eau et éléments nutritifs de la plante.
- ④ **Pourcentage de pierrosité:** c'est le volume occupé par les pierres dans le sol. La pierrosité réduit le volume de sol réellement disponible pour l'enracinement (ANONYME, 1997b).
 - ⑤ **Précipitations d'octobre à mars:** la fraction de soufre soluble est très mobile. ERIKSEN et ASKEGAARD (2000) ont démontré qu'il y a une très forte corrélation entre le drainage annuel et le soufre lessivé ($R^2 = 0,99$, $p < 0,01$). Dans ce modèle, la période du 1^{er} octobre au 31 mars a été retenue comme une période de fort drainage potentiel. En effet, durant ces mois, le taux de couverture du sol, l'enracinement, la croissance des plantes et l'évapotranspiration sont plus faibles que lors de la période de croissance printanière. Cela augmente les risques de pertes par lessivage lors de précipitations abondantes (BLOEM, 1998).
 - ⑥ **Application d'engrais organiques:** les engrais organiques contiennent du soufre en quantité variable selon leur origine et leur mode de gestion. Par exemple, les fumiers et lisiers peuvent contenir entre 0,2 et 1,1 kg S/t, le compost 1,5 kg S/t et le fumier de poulets 3 kg S/t (KOCH *et al.*, 2000). Des apports réguliers d'engrais organiques contribuent directement à la fertilisation soufrée des cultures et indirectement par l'entretien de la matière organique du sol.
 - ⑦ **Fumure azotée:** dans le modèle présenté dans les DBF 2001, un des critères utilisés

était le niveau de rendement. Il a été remplacé par l'intensité de la fumure azotée exprimée par la différence entre la quantité prévue sur une parcelle et la quantité réellement appliquée, en faisant référence à la dose totale d'azote calculée selon les normes corrigées (RYSER *et al.*, 2001); il en résulte trois catégories:

1. La dose N (selon les normes corrigées ou N_{min}):
Dose prévue ± 40 kg N/ha
2. La dose appliquée ou prévue inférieure d'au moins 40 kg N/ha à la dose N (calculée selon les normes corrigées ou N_{min}):
Réduction > 40 kg N/ha
3. La dose appliquée ou prévue supérieure d'au moins 40 kg N/ha à la dose N (calculée selon les normes corrigées ou N_{min}):
Supplément > 40 kg/ha

Ce critère a été sélectionné puisqu'il existe une importante interaction entre la fertilisation soufrée et azotée (FISMES *et al.*, 2000). La plus grande partie du soufre organique des plantes est présente dans les acides aminés et les protéines. Ainsi, en renforçant la fumure azotée, les besoins en soufre augmentent également.

Dispositif expérimental

Les essais de colza ont été conduits sur une période de quatre saisons de cultures s'échelonnant de l'automne 1998 à l'été 2002, sur huit parcelles situées à Changins (VD, 430 m), Burtigny (VD, 680 m), Moosseedorf (BE, 560 m), Biberist (BE, 450 m),

Tableau 2. Paramètres d'évaluation du risque de carence en soufre pour chacun des cas étudiés et somme des points attribués (selon tabl. 1).

Parcelle	Saison	Argile (%)	Matière organique (%)	Profondeur du sol (cm)	Pierrosité (% du volume)	Précipitations 1 ^{er} octobre-31 mars (mm)	Application d'engrais organiques (kg/ha)	Fumure azotée (mm)	Points
2 ¹	98-99	25,7	3,2	20	20	554,8	Aucune	80	17
2 ¹	98-99	25,7	3,2	20	20	554,8	Aucune	160	15
1 ¹	99-00	27,5	2,6	40	20	554,8	Aucune	80	21
1 ¹	99-00	27,5	2,6	40	20	554,8	Aucune	160	19
1 ¹	99-00	27,5	2,6	40	20	554,8	Aucune	240	17
5 ¹	01-02	32,1	3,3	40	40	360,9	Aucune	80	25
5 ¹	01-02	32,1	3,3	40	40	360,9	Aucune	160	23
5 ¹	01-02	32,1	3,3	40	40	360,9	Aucune	240	21
27 ¹	00-01	25	2	40	5	865,3	Aucune	80	25
27 ¹	00-01	25	2	40	5	865,3	Aucune	160	23
27 ¹	00-01	25	2	40	5	865,3	Aucune	240	21
Burt. ²	00-01	17,7	2,2	70	5	522,5	Régulière	85	31
Moos. ³	00-01	19	2,5	125	3	631,8	Régulière	150	27
Bibe. ⁴	01-02	17,5	2,7	80	2,5	327,5	Régulière	120	31
Münc. ⁵	00-01	20	3,5	125	3	631,8	Régulière	150	27

¹Changins (VD, 450 m). ²Burtigny (VD, 680 m). ³Mooseedorf (BE, 560 m). ⁴Biberist (BE, 450 m). ⁵Münchenbuchsee (BE, 560 m).

Münchenbuchsee (BE, 560 m). Sur l'ensemble des parcelles, des doses de soufre variant entre 0, 40, 80 et 120 (quelques cas seulement) kg S/ha ont été appliquées en une fois, principalement sous forme de sulfate de potassium (18% S), pour quelques cas avec du sulfate d'ammoniaque (24% S) ou de la kiesérite (20% S). Les apports de potassium (liés à la fumure soufrée) ont été équilibrés avec du chlorure de potassium (60% K) dans les procédés sans soufre. La fumure azotée a été fractionnée en deux applications, soit généralement à la reprise de la végétation et au début de l'élongation de la tige. Le soufre était appliqué dans cet intervalle de temps.

Certains essais incluaient différentes doses d'azote dans un dispositif expérimental en «split-plot» (le facteur azote en parcelles principales et le soufre en sous-procédés) avec quatre répétitions, alors que les autres étaient disposés en blocs randomisés. La taille des parcelles individuelles variait entre 29,25 et 100 m² selon les situations. Chaque niveau d'azote a été traité comme un cas expérimental indépendant, pour un total de 15 cas étudiés répartis sur huit parcelles (tabl. 2). Les variétés Express et Talent ont été semées à des densités variant entre 44 et 100 grains/m² et cultivées selon des itinéraires techniques comprenant l'application de fongicides et insecticides en cas de nécessité.

Le soufre total prélevé par la culture a été déterminé à partir de la biomasse aérienne trois semaines avant la maturité des plantes. L'analyse du soufre total dans la matière sèche a été effectuée avec un spectromètre de fluorescence des rayons X «Philips 2400» (SCHNUG et HANEKLAUS, 1988; 1992; 1999; PFEIFER *et al.*, 1991) selon une méthode de préparation des échantillons améliorée par le Centre d'analyse minérale de l'Université de Lausanne.

Les teneurs en glucosinolates et en huile des grains ont été évaluées par spectroscopie dans l'infrarouge proche (NIRS). Les

régressions ont été établies à l'aide des logiciels SigmaStat et SigmaPlot (SPSS Science, Chicaco, Illinois).

Résultats et discussion

Relation entre niveau de risque et rendement

Des doses croissantes de soufre ont été appliquées pour chacun des 15 cas expérimentaux étudiés. Dans le tableau 2,

on retrouve les valeurs correspondant aux critères de chaque situation ainsi que le total de points qui leur a été attribué.

Les rendements absolus ont varié entre 12 et 48 q/ha. La figure 1 présente les rendements relatifs (100% = rendement en l'absence de fumure soufrée) en réponse à la fumure soufrée en fonction du nombre de points. Le modèle à points a permis d'expliquer 85% de la variabilité du rendement relatif. Les résultats démontrent que la réponse à la

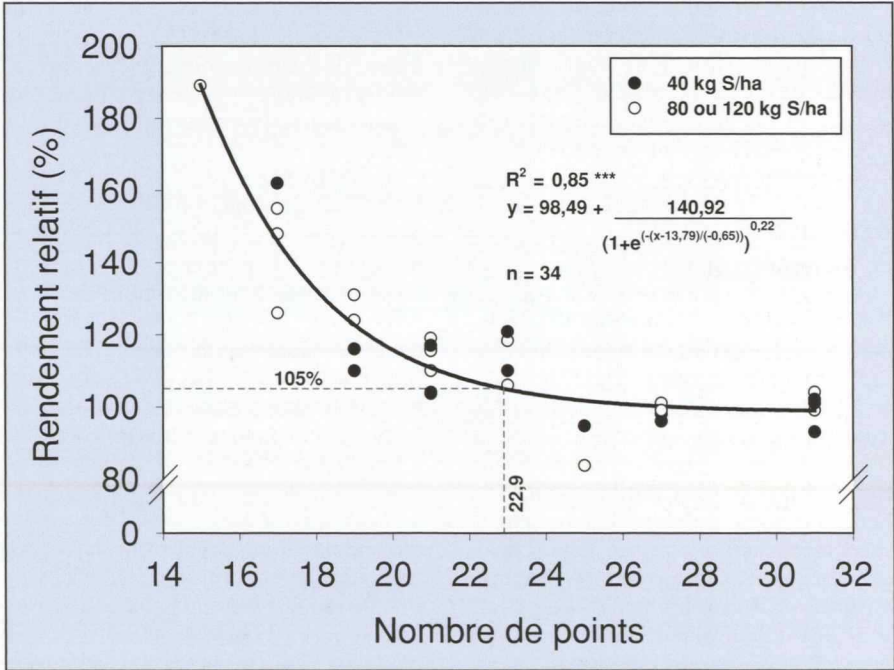


Fig. 1. Réponse du rendement à la fumure soufrée (100% = rendement en l'absence de soufre), en fonction du risque de carence établi selon le modèle à points pour chaque site (tabl. 1 et 2). *** = significatif à p < 0,001.

fumure soufrée a été beaucoup plus importante pour les risques de carence moyens avec de faibles notes et était en moyenne supérieure à 20%. A partir d'un certain nombre de points, il n'y a plus de réponse à l'application de soufre. Un gain de 5% a été fixé comme limite au-dessous de laquelle la fumure soufrée semble inutile. Ainsi, dès 24 points, les applications de soufre sont superflues. Les essais ont été séparés en deux classes: le niveau de risque moyen comprenant les essais de 15 à 23 points et le niveau de risque faible ceux de plus de 23 points. Les parcelles présentant moins de 15 points n'étaient pas représentées, mais elles auraient été classées comme risque élevé de carence en soufre.

Une régression linéaire multiple progressive ascendante a été effectuée dans le but de déterminer les paramètres du système de pointage influençant le plus le rendement. La profondeur du sol est apparue comme le facteur de première importance. Cela confirme les observations générales qui avaient conduit à attribuer plus de points pour ce critère. Venaient ensuite respectivement le pourcentage d'argile du sol, le taux de matière organique et l'azote total disponible (fertilisation azotée + N_{min} en sortie d'hiver). La régression linéaire multiple présentait un coefficient R² de 0,56 (p < 0,05), n = 49. De ces résultats, on pourrait conclure que les précipitations d'octobre à mars et la pierrosité n'ont pas d'influence significative sur le rendement puisqu'elles ont été éliminées lors de la régression linéaire ascendante. Cependant, comme les données expérimentales ne présentaient pas beaucoup de variabilité pour certains critères et que le nombre d'essais était limité, les précipitations et la pierrosité ont été conservées dans le modèle.

Fumure soufrée et rendement

Les figures 2A et 2B présentent la relation entre le rendement relatif du colza (rendement en grains/rendement maximal pour chacun des cas étudiés) et la quantité de soufre appliquée, selon le niveau de risque. Dans les cas de risque moyen (fig. 2A), la fumure soufrée a permis d'accroître significativement le rendement dans six cas sur neuf. La régression (R² = 0,58; p < 0,001) montre qu'une application de 35 kg/ha de soufre permet d'obtenir en moyenne un rendement de 95% du maximum. Pour le risque de carence faible (fig. 2B), le rendement n'a été influencé positivement par la fumure S que dans un seul

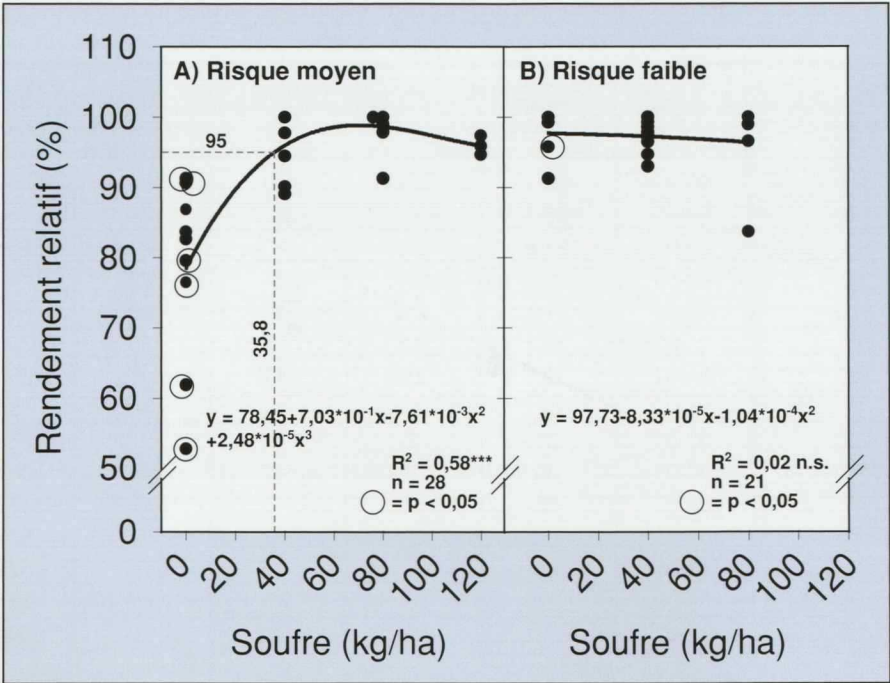


Fig. 2. Influence de la fumure soufrée sur le rendement (100% = rendement maximal observé dans un essai). *** = significatif à p < 0,001. A) risque moyen, B) risque faible. Les cercles indiquent les points pour lesquels la fumure soufrée a causé un accroissement significatif du rendement selon la PPDS (p < 0,05).

cas sur six et, globalement, il n'existait pas de relation entre la fumure S et le rendement. Cela indique qu'en cas de risque faible, on peut faire l'impasse sur la fumure S. Quel que soit le niveau de risque, aucune différence significative n'a été observée entre 40 et 80 kg S/ha. Aucun essai ne présentait de nombre de points au-dessous de 15. L'apport de soufre nécessaire pour les cas de risque élevé a été fixé à 60 kg/ha (RYSER *et al.*, 2001). Cette recommandation doit être nuancée selon le potentiel de rendement souvent faible de parcelles caractérisées par un tel niveau de risque.

Comparativement à nos résultats, McGRATH et ZHAO (1996) ont obtenu une augmentation maximale de rendement avec 10 kg S/ha et un gain a été observé jusqu'à un maximum de 40 kg S/ha. KOCH *et al.* (2000) recommandent des applications de 20 à 40 kg S/ha dans le colza. De plus, pour MERIEN (1993), en moyenne et toutes situations confondues, une application de 30 kg S/ha a permis d'augmenter le rendement de 3,4 q/ha en France dans huit cas sur dix. Le tableau 3 résume les recommandations de fertilisation soufrée selon le nombre de points obtenu avec le modèle présenté. Par rapport à celles des DBF 2001, les recommandations faites ici proposent des limites différentes pour les classes de risque (tabl. 3). En outre, on recommande plutôt 35 que 40 kg S/ha pour le

Tableau 3. Recommandations de fumure soufrée pour le colza d'automne en fonction du nombre de points de la parcelle.

Points (tabl. 1)	Recommandation de fumure soufrée (kg S/ha)
Moins de 15 points	60
15 à 23 points	35
Plus de 23 points	0

risque moyen. Pour le risque faible, une impasse est préconisée ici, au lieu de 20 kg S/ha selon RYSER *et al.* (2001).

Fumure soufrée et prélèvement de soufre par les plantes

Des analyses ont été effectuées dans 11 cas pour la biomasse et 10 cas pour les grains (principalement avec un risque moyen de carence en soufre). Les prélèvements par les plantes variaient entre 10 et 75 kg S/ha pour la biomasse aérienne et entre 6 et 16 kg S/ha pour les grains avec des applications de 0-120 kg/ha de soufre. On note que, pour un apport moyen de 35 kg S/ha, 20 kg de soufre sont restitués avec les résidus de récoltes (fig. 3). Selon la littérature, les besoins totaux en soufre du colza sont de 50 à 80 kg/ha (HOL-

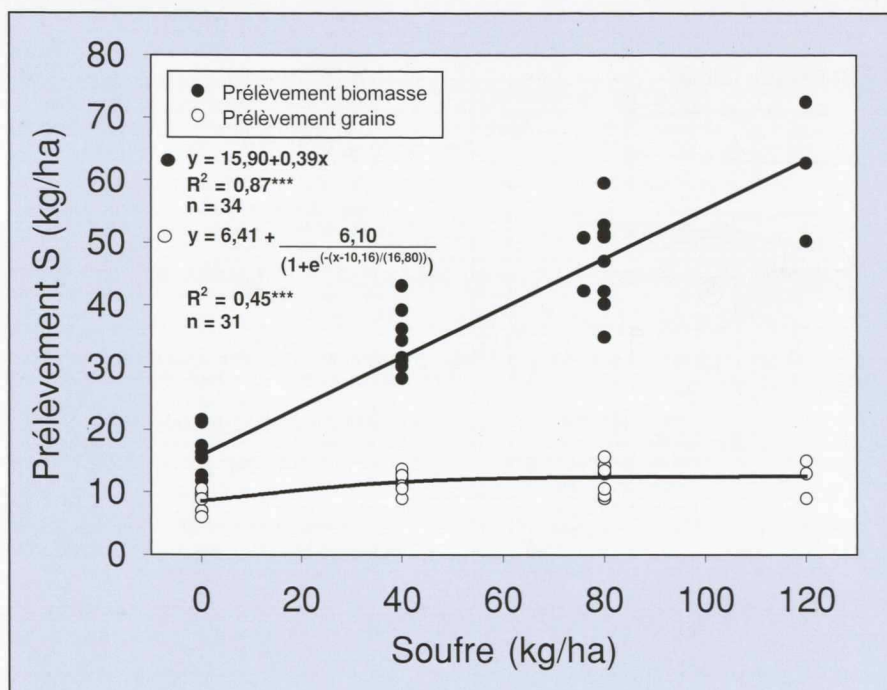


Fig. 3. Influence de la fumure soufrée sur le prélèvement en soufre par la plante et l'exportation par le grain. *** = significatif à $p < 0,001$.

MES, 1980; SCHNUG, 1989; MERRIEN, 1993; ZHAO *et al.*, 1993a; DONALD *et al.*, 1993).

Même s'il suit une droite proportionnelle aux quantités de soufre appliquées, le prélèvement est inférieur aux apports, particulièrement pour les fumures supérieures à 40 kg S/ha. Le rendement stagnant à des niveaux de fertilisations élevés, l'apport de soufre supplémentaire ne contribue plus à l'élaboration du rendement mais s'accumule dans différentes parties de la plante, entre autres sous forme de glucosinolates (SCHNUG, 1989; WITHERS et O'DONNELL, 1994; FIELSEND et MILFORD, 1994).

Fumure soufrée et qualité de la récolte

Pour le colza, deux principaux facteurs de qualité sont à considérer: la faible teneur en glucosinolates et la richesse en huile.

Teneur en glucosinolates

De nos jours, toutes les variétés cultivées en Suisse ont des teneurs faibles en glucosinolates et en acide érucique (00). On recherche une teneur en glucosinolates faible $\pm 20 \mu\text{mol/g}$ de grain) puisque ces composés ont une influence négative sur la qualité des tourteaux destinés aux animaux monogastriques (porcs et volailles).

La disponibilité en soufre est le facteur qui influence le plus la concentration

en glucosinolates dans le colza 00 (SCHNUG, 1989). Sur les figures 4A et 4B, on observe une augmentation de la teneur en glucosinolates dans les grains en fonction du soufre apporté. Ce phénomène avait également été observé par ZHAO *et al.* (1993b) et par SCHNUG (1989). Cette augmentation est très nette en situation de risque moyen de carence (fig. 4A; $R^2 = 0,81$; $p < 0,01$ pour 9/9

essais). Toutefois, dans trois cas sur six de risque faible (fig. 4B), on a également constaté une augmentation significative ($p < 0,01$). La courbe de régression tracée pour l'ensemble des observations en risque moyen est significative ($R^2 = 0,81$; $p < 0,001$), contrairement à celle des cas de risque faible. Ainsi, il apparaît que, dans certaines situations, des apports de soufre non justifiés augmenteraient la teneur en glucosinolates et pourraient diminuer la qualité des récoltes. Cependant, dans tous les essais, les teneurs en glucosinolates n'ont jamais atteint la limite de $20 \mu\text{mol/g}$.

Teneur en huile

L'analyse de la richesse en huile du grain n'a démontré aucune réponse significative à la fumure soufrée pour les cas classés dans les risques de carence faibles (0/6). Pour les risques modérés de carence, quatre cas sur neuf ont révélé une augmentation significative de la teneur en huile avec l'apport de fumure soufrée (fig. 5). Cependant, le regroupement des essais n'a pas permis de noter de tendance générale. On constate des résultats divergents chez différents auteurs. FISMES *et al.* (2000) n'ont pas obtenu de réponse significative pour la concentration en huile en réponse au soufre dans un dispositif d'essais au champ mais, en pots, ils ont noté une légère diminution de la richesse en huile avec l'application de fumure sou-

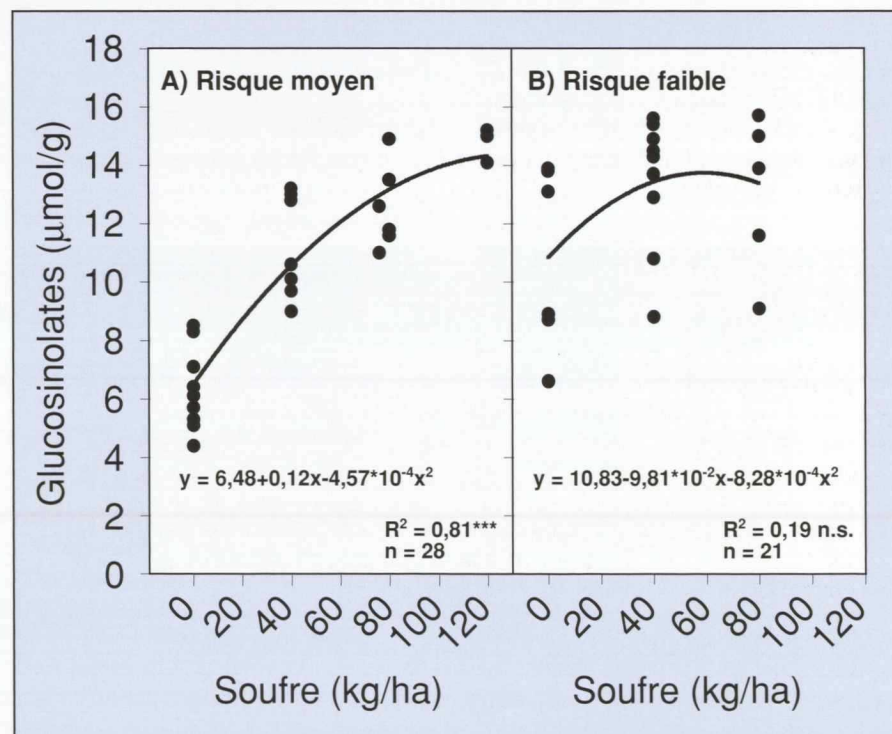


Fig. 4. Influence de la fumure soufrée sur la concentration en glucosinolates dans les grains. *** significatif à $p < 0,001$, n.s. = non significatif.

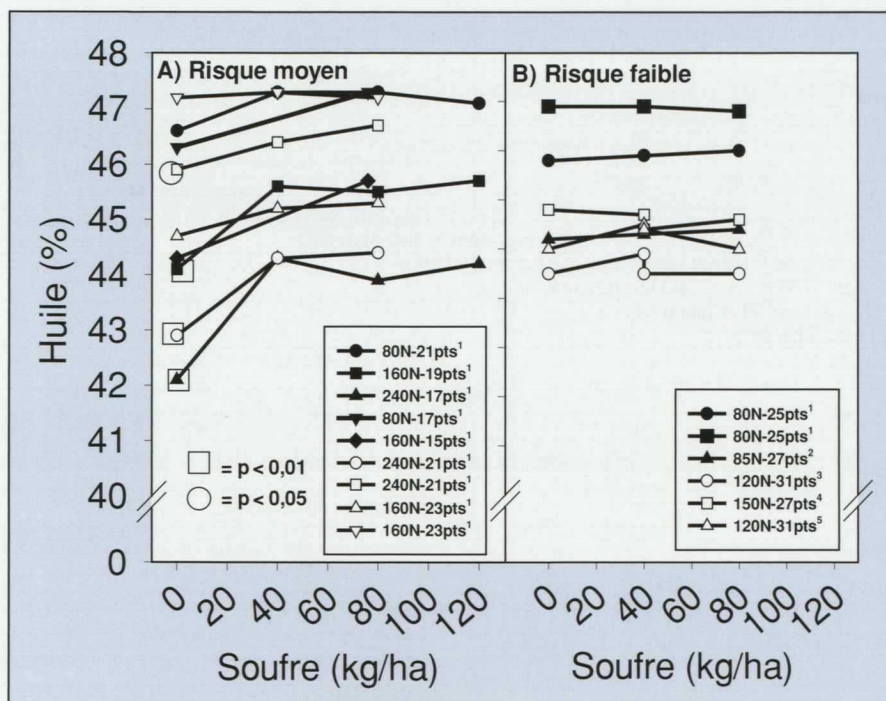


Fig. 5. Influence de la fumure soufrée sur la teneur en huile des grains. 1 = Changins, 2 = Burtigny, 3 = Biberist, 4 = Moosseedorf, 5 = Münchenbuchsee. Les cercles indiquent les points pour lesquels la fumure soufrée a causé un accroissement significatif du rendement selon la PPDS ($p < 0,05$). A) risque moyen, B) risque faible.

frée. De leur côté, WITHERS et O'DONNELL (1994) ont observé une diminution de la concentration en huile et McGRATH et ZHAO (1996) n'ont enregistré aucune réponse la première année d'essais, puis une augmentation significative la deuxième année. Quant à PINKERTON (1998), il relève que les plus hautes concentrations d'huile ont été atteintes avec une application intermédiaire de soufre lors d'expérimentations en serre. Selon ZHAO *et al.* (1993b), ces différents types de réponse à l'application de fumure soufrée pourraient être expliqués par l'interaction entre l'azote et le soufre.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'action européenne COST 829 «Fundamental, agronomical and environmental aspects of sulfur nutrition and assimilation in plants», dont les projets suisses ont été financés par l'Office fédéral de l'éducation et de la science (OFES). Nos remerciements aux collègues J.-Y. Deru (RAP), W. Schild (RAC) et J.-F. Parisod (RAC), qui ont respectivement œuvré aux analyses de glucosinolates, teneur en huile du grain et N_{min} . Merci également à tous ceux qui ont contribué à la mise au point de ce manuscrit.

Conclusions

- ❑ Le modèle de prévision du risque de carence en soufre a permis de classer les parcelles en trois catégories, chacune étant associée à une recommandation de fumure soufrée appropriée: 60 kg S/ha pour moins de 15 points (risque élevé), 35 kg S/ha pour 15-23 points (risque moyen) et 0 kg S/ha dès 24 points (risque faible).
- ❑ L'application de soufre a entraîné des augmentations significatives de rendement (20% en moyenne) pour les cas de risque modéré mais n'a eu aucune influence sur les cas à risque faible. Au-delà de 40 kg S/ha, le soufre ne contribue plus à accroître le rendement.
- ❑ Le prélèvement total de soufre par les plantes était proportionnel à la disponibilité de cet élément. Au-delà d'une certaine quantité, le soufre absorbé s'est accumulé dans différentes parties de la plante, ne contribuant plus à la formation du rendement. Il peut notamment s'accumuler sous forme de glucosinolates. Ainsi, des applications de soufre injustifiées peuvent réduire la qualité du colza.
- ❑ Dans la moitié des cas à risque de carence moyen étudiés, la fumure soufrée a contribué à améliorer la richesse en huile du grain tandis que, dans les cas à faible risque, ce paramètre n'a pas été influencé.

Bibliographie

- ANONYME, 2002. Environnement suisse 2002. Politique et perspectives-Air. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne, 19-31.
- ANONYME, 1997a. ASS-der Schwefel-Stickstoffdünger. BASF Aktiengesellschaft Vertriebsstandorte Agro, Limburgerhof, 39 p.
- ANONYME, 1997b. Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. *Schriftenreihe der FAL* 24.
- BLOEM E. M., 1998. Schwefel-Bilanz von Agrarökosystemen unter besonderer Berücksichtigung hydrologischer und bodenphysikalischer Standorteigenschaften. Wissenschaftliche Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig (FAL), 156 p.
- BONH H. L., BARROW N. J., RAJAN S. S. S., PARFITT R. L., 1986. Reaction of inorganic sulfur in soils. In: Sulphur in agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, 233-249.
- CECCOTTI S. P., MORRIS R. J., MESSIK D. L., 1998. A Global overview of the sulphur situation: Industry's background, market, trends, and commercial aspects of sulphur fertilizers. In: Sulphur in Agroecosystems. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 175-202.
- DONALD D., SHARP G. S., ATKINSON D., DUFF E. I., 1993. Effect of nitrogen and sulphur fertilization on the yield and composition of winter oilseed rape. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24, 813-826.
- ERIKSEN J., MURPHY M. D., SCHNUG E., 1998. The soil sulphur cycle. In: Sulphur in Agroecosystems. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 39-73.
- ERIKSEN J., ASKEGAARD M., 2000. Sulphate leaching in an organic crop rotation on sandy soil in Denmark. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 78, 107-114.
- FIELDSEND J., MILFORD G. G. J., 1994. Changes in glucosinolates during crop development in single- and double-low genotypes of winter oilseed rape (*Brassica napus*): I. Production and distribution in vegetative tissues and developing pods during development and potential role in the recycling of sulphur within the crop. *Ann. Appl. Biol.* 124, 531-542.
- FISMES J., VONG P. C., GUCKERT A., FROSSARD E., 2000. Influence of sulfur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown on a calcareous soil. *European Journal of Agronomy* 12, 127-141.
- KOCH H.-J., BAUMGÄTEL G., CLAASSEN N., HEGE U., HEYN J., LINK A., ORLOVIUS K., PASDA G., SUNTHIEM L., 2000. Schwefelversorgung von Kulturpflanzen-Bedarfsprognose und Düngung. www.vdlufa.de.
- GUPTA A. K., PAULSEN H. M., HANEKLAUS S., SCHNUG E., 1997. Comparative efficacy of selected S Sources. *Sulphur in Agriculture* 20, 15-20.
- HOLMES M. R. J., 1980. Nutrition of the oilseed rape crop. Chapter 5. Applied Science, London, 158 p.
- McGRATH S. P., ZHAO F. J., 1996. Sulphur uptake, yield responses and the interactions between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (*Brassica napus*). *Journal of Agricultural Science* 126, 53-62.
- MERRIEN A., 1993. La fertilisation soufrée du colza d'hiver. *Oléoscope* N° spécial 6, 17 p.

PFEIFER H.-R., LAVANCHY J.-C., SERNEELS V., 1991. Bulk chemical analysis of geological and industrial materials by X-ray fluorescence, recent developments and application to materials rich in iron oxide. *J. Trace and microprobe Techniques* **9**, 127-147.

PINKERTON A., 1998. Critical sulfur concentrations in oilseed rape (*Brassica napus*) in relation to nitrogen supply and to plant age. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **38**, 511-522.

RYSER J.-P., WALTHER U., FLISCH R., 2001. DBF 2001. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages. *Revue suisse Agric.* **33** (3), 4-80.

SCHERER H. W., 2001. Sulphur in crop production - Invited paper. *European Journal of Agronomy* **14**, 81-111.

SCHNUG E., 1989. Double-low oilseed rape in West Germany: sulphur nutrition and glucosinolate levels. *Aspects of Applied Biology* **23**, 67-82.

SCHNUG E., HANEKLAUS S., 1988. Theoretical principles for the indirect determination of the total glucosinolate content in rapeseed and meal quantifying the sulphur concentration via X-ray fluorescence (X-RF method). *J. Sci. Food Agric.* **45**, 243-254.

SCHNUG E., HANEKLAUS S., 1992. Sulfur and light element determination in plant material by X-ray fluorescence spectroscopy. *Phyton annales Rei botanicae* **32**, 123-126.

SCHNUG E., HANEKLAUS S., 1999. Diagnosis of the nutritional status and quality assessment of oilseed rape by X-ray spectroscopy. In: Proceedings 10th International rapeseed congress, 26-29 September, 1999, Canberra (CD-ROM).

WITHERS P. J. A., O'DONNELL F. M., 1994. The response of Double-low winter oilseed rape to fertiliser sulphur. *J. Sci. Food Agric.* **66**, 93-101.

ZHAO F. J., EVANS E. J., BILBORROW E. E., SYERS J. K., 1993a. Sulphur uptake and distribution in double and single low varieties of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Plant and Soil* **150**, 69-76.

ZHAO F. J., EVANS E. J., BILBORROW E. E., SYERS J. K., 1993b. Influence of nitrogen on seed yield and quality of low glucosinolate oilseed rape (*Brassica napus* L.). *J. Sci. Food Agric.* **63**, 29-37.

ZHAO F. J., HAWKESFORD M. J., MCGRATH S. P., 1999. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. *Journal of Cereal Science* **30**, 1-17.

Summary

Optimisation of sulphur fertilisation by deficiency risk assessment.

I. Winter oilseed rape

The experimental results of four growing seasons (1999-2002) were analysed to improve a prediction model of sulphur deficiency for winter oilseed rape previously presented in the «DBF 2001» (RYSER *et al.*, 2001). This scoring model based on agronomic pedologic and climatic criteria explained 85% of yield variability in response to sulphur fertilisation. In order of importance, the parameters of the model were soil depth, clay content, organic matter and plant-available nitrogen. Moreover, rainfall between October to March, stone content and frequency of organic fertiliser applications were also taken into account. The risk of deficiency was divided into 3 categories. The threshold for low risk was set at a score of 24 points and no S fertilisation was required for oilseed rape grown at low risk sites. The optimum S application of the medium risk with a score from 15 to 23 points was determined at 35 kg S/ha. The high risk of deficiency (score under 15 points) was not represented in the experiment but a proposition of fertilisation as high as 60 kg S/ha has been made. The effects of S fertilisation on total S uptake in the aerial biomass and quality of the harvested grains were also evaluated. A significant increase of total S uptake in response to S fertilisation was observed. Besides, the glucosinolates concentration in the grains also increased significantly with S application for all cases of moderate risk and for 3 out of 6 cases at low risk sites. Finally, sulphur had a positive influence on seed oil content of 4 out of 9 cases of moderate risk and no effect on the low risk sites.

Key words: winter oilseed rape, sulphur deficiency, model, yield, S-fertilisation, oil content, glucosinolates, sulphur uptake.

Zusammenfassung

Methode zur Einschätzung des Risikos von Schwefelmangel. I. Winterraps

Die Resultate von Schwefeldüngungsversuchen über eine Periode von vier Jahren (1999-2002) dienten der Verbesserung einer Methode zur Abschätzung des Risikos für Schwefelmangel bei Winterraps. Diese wurden in den *Grundlagen zur Düngungsplanung im Ackerbau und Futterbau* vorgestellt (RYSER *et al.*, 2001).

Mit dieser Methode zur Risikoabschätzung, welche auf agronomischen, pedologischen und klimatischen Kriterien beruht, konnten 85% der Variabilität des Ertrages als Folge der Schwefeldüngung erklärt werden. Die wichtigsten Parameter bei der Verteilung der Risikopunkte geordnet nach ihrer Bedeutung waren die Tiefgründigkeit des Bodens, der Tongehalt des Bodens in %, die organische Substanz und der verfügbare Stickstoff. Weitere berücksichtigte Parameter waren die Niederschläge von Oktober bis März, der Gehalt an Steinen und die Häufigkeit der Hofdüngeranwendung.

Das Risiko für Schwefelmangel wurde in drei Kategorien eingeteilt. Die Schwelle für ein geringes Risiko wurde bei 24 Punkten festgelegt. In dieser Kategorie wird keine Schwefeldüngung empfohlen. Für den Bereich mit einem mittleren Risiko (15-23 Punkte) wurde eine optimale Schwefeldüngung von 35 kg/ha ermittelt. Die Kategorie mit einem hohen Risiko für Schwefelmangel (< 15 Punkte) war in den Versuchen nicht vertreten. Hier wurde eine empfohlene Schwefelgabe von 60 kg/ha festgelegt. Die Schwefeldüngung führte zu einer signifikant höheren Aufnahme dieses Nährstoffes durch die Pflanzen. Zudem war der Glucosinolatgehalt in den Samen als Folge der Schwefeldüngung in allen Versuchen mit einem mittleren Risiko für Schwefelmangel und in 3 von 6 Versuchen mit einem geringen Risiko signifikant höher. Der Ölgehalt wurde in 4 von 9 Versuchen mit mittlerem Mangelsrisiko positiv beeinflusst, während der Ölgehalt in den Versuchen mit geringem Risiko nicht erhöht wurde. Diese Methode zur Abschätzung des Risikos für Schwefelmangel ermöglicht den Landwirten eine gezielte Schwefeldüngung von Winterraps.

Toujours actuel

La fumure des prairies et des pâturages

Edition 1998

CHF 4.50-

Document en COULEUR de 16 pages rédigé par la RAC, l'ADCF et le SRVA et conçu spécialement pour les agriculteurs

COMMANDE:

Station fédérale de Changins, Service Info, CH-1260 Nyon 1, tél. (+41) 22 363 41 51/52, fax (+41) 22 363 41 55.

25^e Workshop Mycotoxines

19 au 21 mai 2003, Giessen, Allemagne

Cet atelier, qui se tient chaque année depuis 1979, ne rassemblait à l'origine que quelques spécialistes en mycotoxines d'Allemagne; depuis lors, il s'est mué en forum de près de 200 participants provenant de différents pays d'Europe. On y discute des questions analytiques et des contaminations auxquelles les consommateurs sont confrontés, de même que des problèmes de mycotoxines en production végétale et en alimentation animale. Voici un aperçu de quelques résultats importants pour l'agriculture présentés à la réunion de cette année.

Dans trois enquêtes comparatives, on arrive à la conclusion que les céréales bio examinées ne sont pas davantage contaminées que les céréales de culture conventionnelle; la tendance est plutôt à l'inverse: les céréales bio sont moins chargées en toxines de *Fusarium*.

Diverses études – parmi lesquelles nos données provenant de récoltes suisses – montrent que l'avoine est rarement contaminée par le désoxynivalénol (DON), mais par contre souvent par la T2-toxine, qui généralement ne fait pas partie des analyses de routine. C'est pourquoi il serait indiqué de rechercher également la T2-toxine dans l'avoine.

Alors que le fourrage vert est peu contaminé au printemps et en été, on y trouve souvent de la zéaralénone et de l'ochratoxine en fin de période de végétation. Les teneurs se situent toutefois dans des valeurs insignifiantes pour des ruminants.

C'est au voisinage du sol que la tige de la plante de maïs est le plus fortement contaminée par des mycotoxines; ainsi, en élevant la hauteur de coupe à 30 cm, la teneur en mycotoxines du maïs peut être réduite d'environ 20%.

Un essai a montré que certaines souches définies de Dématiacées (moisissures du champ) peuvent produire des toxines dans les céréales et leur présence peut amplifier les effets nocifs des toxines de *Fusarium*.

Des essais sur des porcs en croissance ont montré que, pour la mycotoxine DON en conditions d'essai contrôlées, ce n'est qu'à partir de concentrations de 3 mg par kg d'aliment qu'une diminution de la consommation et une inhibition de la croissance sont observées. La digestibilité des nutriments n'est pas influencée négativement dans cette plage de valeurs.

Dans un essai avec des truies, des concentrations dans l'aliment aussi faibles que 0,2 mg/kg de zéaralénone et 2,7 mg/kg de DON ont produit des effets négatifs sur la fertilité et sur la santé des porcelets nouveau-nés.

Diverses études sur des bovins ont confirmé la faible sensibilité des ruminants à de nombreuses mycotoxines. Lorsque les animaux consomment de grandes quantités d'aliments contaminés par le DON ou l'ochratoxine, de légères influences négatives ont bien été observées sur les processus microbiens dans la panse, mais aucune indication d'atteinte à la santé des animaux.

Dans l'UE pour l'instant, aucun additif liant ou inactivant les toxines de *Fusarium* n'a encore été autorisé car, jusqu'à présent, aucune de ces préparations n'a démontré d'efficacité. Une firme a présenté des premiers essais en laboratoire avec des levures qui dégradent certaines mycotoxines. Comme les essais de laboratoires ne sont pas à même de bien simuler la complexité des conditions régnant dans l'estomac et l'intestin des animaux, ces levures seront prochainement testées dans des essais *in vivo*.

Différents instituts ont mis au point des méthodes d'analyse pour la détermination de mycotoxines dans les liquides biologiques comme le sang, l'urine ou la bile. Dans les essais avec animaux, ces analyses permettent de déterminer l'absorption, la durée du séjour de ces substances dans le corps et leur élimination. En cas de suspicion de dommages dus à des mycotoxines dans la pratique, il devrait être possible à l'ave-

nir d'analyser des échantillons d'urine ou de sang au lieu d'aliments, afin d'assurer le diagnostic. Comme la plupart des mycotoxines ne s'accumulent pas dans le corps, mais s'éliminent au contraire presque totalement en quelques jours, les résultats d'analyse ne peuvent cependant renseigner que sur la charge momentanée en mycotoxines.

Il est au moins aussi important que l'échantillon prélevé soit représentatif que de disposer d'une méthode d'analyse précise de détection de mycotoxines dans les aliments pour animaux. Comme la plupart du temps les mycotoxines ne sont pas réparties de manière homogène dans l'aliment, il serait souhaitable de procéder à un échantillonnage d'une grande quantité de matériel. Dans l'UE par exemple, pour la détection de l'aflatoxine, il est prescrit de prélever un échantillon de 30 kg!

L'atelier de réflexion a donné un bon aperçu de l'état récent des connaissances sur les mycotoxines. D'un côté, on entend dire qu'en cas de maladies ou de performances amoindries des animaux de rente, on accuse trop souvent les mycotoxines. De l'autre côté, selon les présentations et les discussions, on peut prévoir qu'il existe encore de nombreuses mycotoxines pas ou peu connues à ce jour, susceptibles de nuire à la santé.

Pour mémoire, les valeurs d'orientation du Ministère allemand de l'agriculture pour les mycotoxines DON et zéaralénone dans les aliments pour animaux sont données dans le tableau 1.

Andreas Gutzwiller
Station fédérale de recherches
en production animale, 1725 Posieux

Tableau 1. Teneurs admissibles en DON et zéaralénone dans les aliments pour animaux (mg/kg d'aliment; à 88% matière sèche).

Espèce ou catégorie d'animaux	DON	Zéaralénone
Truie pré-pubertaire	1,0	0,05
Porc à l'engrais, truie d'élevage	1,0	0,25
Bovin pré-ruminant	2,0	0,1
Bovin d'élevage, vache laitière	5,0	0,5
Bovin à l'engrais	5,0	–
Poule	5,0	–